

海岸護岸の越波特性に及ぼす海面上昇の影響

井上 雅夫*・島田 広昭**・坂本 佳弘***

1. 緒 言

近年、世界各国のさまざまな分野で地球の温暖化に対して強い関心が寄せられている。特に、わが国は海岸線の総延長が約3万4千kmにも及ぶことなどから、地球の温暖化によって起こる海面上昇や台風の大規模化はきわめて重要な問題として注目されている。しかし、これまで津波や高潮災害などのように短期間で発生するものについての研究は数多く行われているが、地球温暖化による海面上昇や台風の大規模化など、その影響がかなりの長期間にわたって徐々に現れるものに対する研究はあまりなされていないのが現状であろう。

そこで本研究では、潮位と波浪規模、具体的にはのり先水深・波長比と波形勾配を種々変化させた不規則波による海岸護岸の越波に関する模型実験を行い、海面上昇に対する現存護岸の越波特性を検討し、その越波防止機能の低下を予測しようとした。特に、模型実験で対象とした護岸は、従来現場で多用されてきた傾斜護岸と近年施工数の増加が著しい緩傾斜護岸の二つとし、いずれのほうが海面上昇に対して好ましい越波特性を有しているかを明らかにしようとした。

2. 実験装置および方法

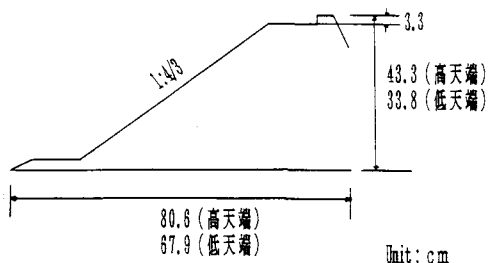
模型実験の縮尺は1/30とし、フルードの相似律を適用した。実験では、不規則波造波機を有する二次元水槽中に、勾配が1/30の模型海浜を設け、その上に模型護岸を設置して、それを越える不規則波群の越波率（越波数と全波数の比）と越波流量の測定を行った。模型護岸は、図-1に示すような、のり面勾配が1:4/3の傾斜護岸とのり面勾配が1:15の緩傾斜護岸の2種類を対象とした。護岸の底面からの天端高は原型のものに対応させると、傾斜型護岸では43.3cm、緩傾斜護岸では33.8cmになるが、比較のためにいずれの護岸についても、高低両方の天端高の場合について実験を行った。すなわち、のり面勾配と天端高をそれぞれ2種類に変化させ、それら

を組み合わせた全部で4種類の護岸形状を実験の対象とした。実験波は、有義波周期が1.0sのBretschneider・光易型スペクトルを有する不規則波であり、その波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ は0.01, 0.02, 0.03, 0.04および0.05の5種類とした。また、のり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ は0.194~0.239の間で9種類に変化させ、海面上昇量が原型で110cmまでの潮位変化に対応できるようにした。

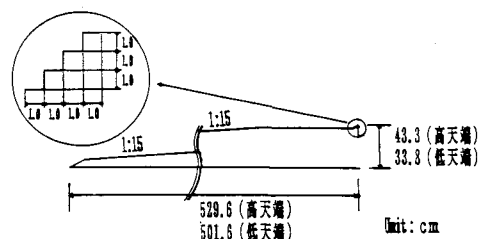
3. 実験結果および考察

3.1 越波率、越波流量に及ぼすのり先水深・波長比と波形勾配の影響

図-2(a)および(b)は、天端高が低い場合の越波率 γ_0 とりのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係であり、それぞれ緩傾斜護岸と傾斜護岸のものである。これによると、緩傾斜護岸の越波率は、いずれの波形勾配であってものり先水深・波長比の増大、すなわち潮位の上昇とともに顕著に増大する傾向を示している。一方、傾斜護岸のもの



(a) 傾斜護岸



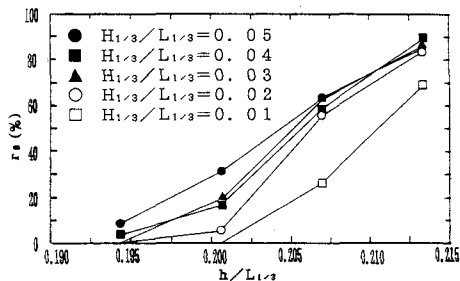
(b) 緩傾斜護岸

図-1 護岸模型

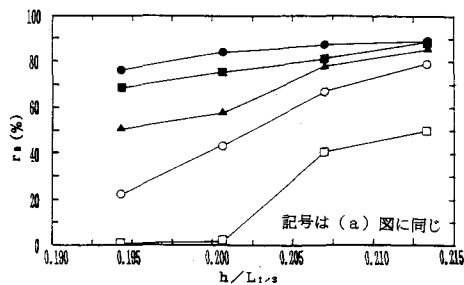
* 正 会 員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 関西大学助手 工学部土木工学科

*** 学生会員 関西大学大学院



(a) 低天端緩傾斜護岸



(b) 低天端傾斜護岸

図-2 越波率とりの先水深・波長比との関係

のは波形勾配が0.03より小さい場合はりの先水深・波長比の増大とともに越波率も著しく増大する傾向がみられるが、波形勾配が0.04より大きくなるとりの先水深・波長比の増大による越波率の増加はあまり著しくない。このため、図-2(a)および(b)に示した低天端の緩傾斜護岸と傾斜護岸の越波率を比較すると、りの先水深・波長比が小さいときは傾斜護岸のほうがかなり大きい、りの先水深・波長比の増大とともにその差が小さくなる。特にこうした傾向は波形勾配が小さい場合に著しく、波形勾配が0.03以下の場合には、緩傾斜護岸の越波率が傾斜護岸のものより大きくなる場合もある。

図-3は、高天端傾斜護岸の場合の越波率 r_0 とりの先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係である。なお、高天端緩傾斜護岸の場合はいずれの波形勾配およびりの先水深・波長比でも越波しなかった。これによると、高天端傾斜護岸についても波形勾配が小さい場合には越波しないが、波形勾配が大きくなると低天端傾斜護岸の場合とほぼ同じ傾向がみられる。

図-4(a)および(b)は、天端高が低い場合の越波率 r_0 と波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ との関係であり、それぞれ緩傾斜護岸と傾斜護岸のものである。これらによると、いずれのりの先水深・波長比の場合についても、越波率は波形勾配の増大とともに、(a)図の緩傾斜護岸ではあまり増大しないのに対し、(b)図の傾斜護岸ではかなり急激に増大している。

図-5(a)および(b)は、図-2(a)および(b)に対応した無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_{1/3})^3}$ とりの先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係である。これらによると、(a)図の緩傾斜護岸では、いずれの波形勾配でもりの先水深・波長比の増大とともに無次元越波流量は著しく増加する傾向を示している。また、りの先水深・波長比が約0.21以上で無次元越波流量は波形勾配にかかわらずほぼ一定値を示し、緩傾斜護岸では波形勾配が小さい場合ほど、りの先水深・波長比の影響、すなわち海面上昇による影響が大きいことがわかる。(b)図の傾斜護岸の無次元越波流

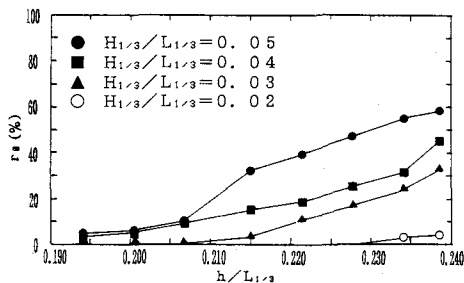
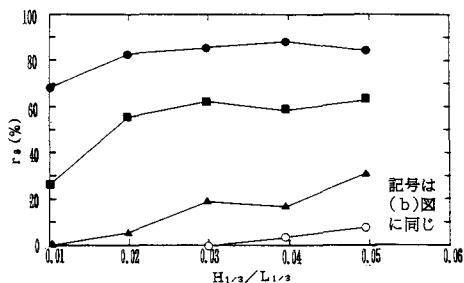
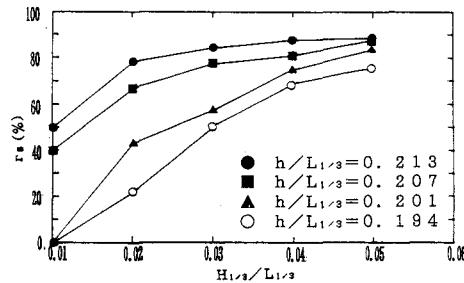


図-3 越波率とりの先水深・波長比との関係
(高天端傾斜護岸)

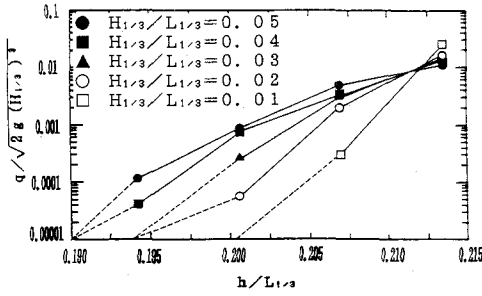


(a) 低天端緩傾斜護岸

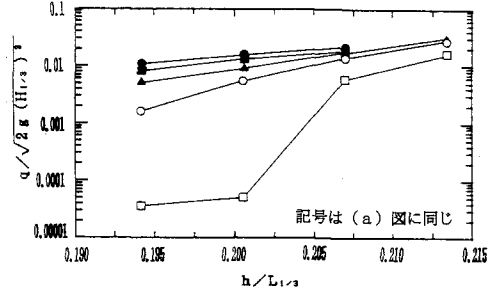


(b) 低天端傾斜護岸

図-4 越波率と波形勾配との関係



(a) 低天端緩傾斜護岸



(b) 低天端傾斜護岸

図-5 無次元越波流量とのり先水深・波長比との関係

量も、波形勾配にかかわらず、のり先水深・波長比の増大とともに増加し、この傾向は波形勾配が小さいほど著しい。したがって、のり先水深・波長比が大きくなると、いずれの波形勾配に対する無次元越波流量もほぼ同じ値になる。また、図-5(a) および (b) に示した低天端の緩傾斜護岸と傾斜護岸の越波流量を比較すると、越波率の場合とほとんど同様な傾向がみられる。また、図示はしていないが、低天端護岸の越波流量と波形勾配との関係についても図-4 に示した越波率の場合ほど明確ではないが、傾斜護岸の越波流量が緩傾斜護岸のものよりも波形勾配の影響が大きいことがわかる。

図-6 は、高天端傾斜護岸の場合の無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_{1/3})^3}$ とのり先水深・波長比 $h/L_{1/3}$ との関係である。なお、高天端緩傾斜護岸の場合はいずれの波形勾配およびのり先水深・波長比でも越波しなかった。これによると、高天端傾斜護岸の無次元越波流量は、波形勾配が0.04や0.05のようにかなり大きい場合には、のり先水深・波長比の影響は小さいが、波形勾配が0.03程度より小さい場合にはその影響がかなり大きいことがわかる。このように、すべての実験条件に対し越波しなかった高天端緩傾斜護岸を除き、いずれの護岸の越波流量ものり先水深・波長比や波形勾配の増大とともに増大する。また、直接図示はしていないが、この増大量は低天端護岸のものが高天端護岸のものより大きい。

以上のことから、緩傾斜護岸および傾斜護岸のいずれについても、潮位が上昇し、のり先水深が大きくなると越波率は増大し、特に緩傾斜護岸では、波形勾配にかかわらずその傾向が顕著であるといえる。また、越波流量についても、越波率とほぼ同様な傾向がみられるが、特に緩傾斜護岸で波形勾配が小さい場合には越波流量に及ぼす潮位上昇の影響がきわめて大きいことがわかった。

3.2 海面上昇による海岸護岸の越波防止機能の低下予測

ここでは海面上昇量を IPCC の試算(三村ら, 1991), すなわち、2100 年までに 65 cm (下限値 30 cm, 上限値

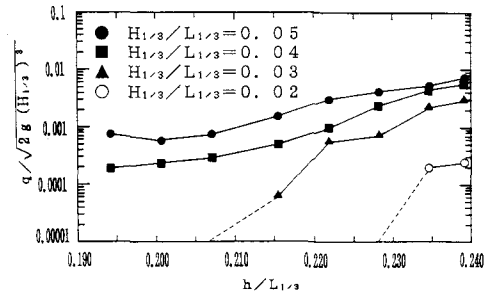
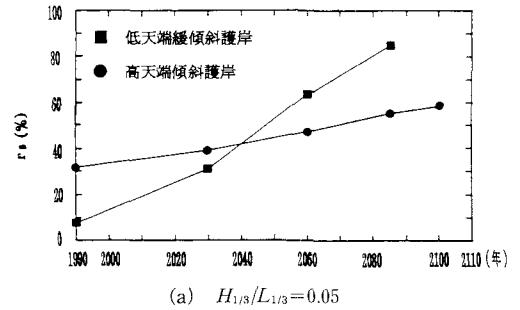
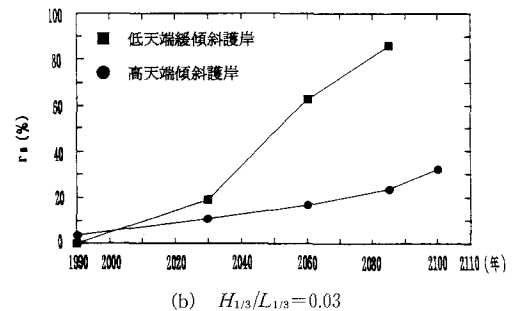


図-6 無次元越波流量とのり先水深・波長比との関係 (高天端傾斜護岸)



(a) $H_{1/3}/L_{1/3}=0.05$



(b) $H_{1/3}/L_{1/3}=0.03$

図-7 傾斜護岸と緩傾斜護岸の越波率

110 cm) の海面上昇が生じるという結果をもとに、越波特性に及ぼす海面上昇の影響をより具体的なものにするため、予測上限値を前述の実験結果に対応させてそれぞれの護岸の越波防止機能を検討する。まず、ここでは1990年を基準とし、2030年までに30 cm、2060年までに60 cm、2085年までに90 cm、2100年までに110 cmの海面上昇があるものとした。

図-7は、現状の低天端緩傾斜護岸と高天端傾斜護岸における越波率 η_0 を比較したものである。これらによると、(a)図の波形勾配が0.05の場合、現状の越波率は、傾斜護岸では約30%、緩傾斜護岸では約10%であり、後者のほうが越波防止機能は優れている。しかし、傾斜護岸の越波率よりも緩傾斜護岸のもののほうが、海面上昇の影響が大きいため、2040年ごろには傾斜護岸と緩傾斜護岸の越波率の大小関係が逆転し、緩傾斜護岸のほうが大きくなっている。(b)図の波形勾配が0.03の場合については、(a)図の傾向がさらに明確に現われ、2005年ごろには傾斜護岸と緩傾斜護岸の越波率の大小関係が逆転して緩傾斜護岸のほうがきわめて大きくなり、2085年ごろには緩傾斜護岸の越波率は傾斜護岸のものの約4倍にも達することになる。

図-8は、低天端緩傾斜護岸と高天端傾斜護岸の無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_{1/3})^3}$ を比較したものである。これらによると、(a)図の波形勾配が0.05の場合、図-7(a)に示した越波率と同様に、現状では緩傾斜護岸の越波流量が傾斜護岸のものよりかなり小さいが、傾斜護岸よりも緩傾斜護岸のほうが海面上昇の影響を受けやすいため、2060年ごろには傾斜護岸と緩傾斜護岸の越波流量の大小関係が逆転し、緩傾斜護岸のもののほうが若干大きくなっている。(b)図の波形勾配が0.03の場合についても、図-7(b)に示した越波率と同様に、前述の傾向が明確に現われ、2040年ごろには傾斜護岸と緩傾斜護岸の無次元越波流量の大小関係が逆転し、緩傾斜護岸のもののほうが大きくなっている。

図-9は、低天端緩傾斜護岸と高天端傾斜護岸について、波形勾配が0.05の場合における越波流量の増加率 R を比較したものである。縦軸は各年の越波流量と1990年の越波流量の比 R である。これによると、傾斜護岸における R は年月の経過とともに若干増大するが、その増加する割合は小さく、2100年(上昇量110 cm)になっても現在の5倍程度の増大量にとどまっている。一方、緩傾斜護岸における R は、1990～2030年(海面上昇量0～30 cm)にかけては5倍程度の増加量であるが、2030年以降になると R は急激に増大し、2060年(上昇量60 cm)には40倍、2085年(上昇量90 cm)には90倍以上にもなっている。この原因は、傾斜護岸と緩傾斜護岸の越波機構の違いによるものと考えられる。すなわち、緩傾斜護

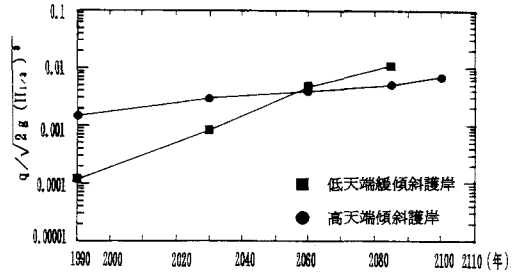
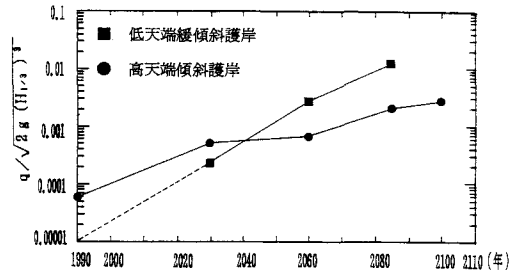
(a) $H_{1/3}/L_{1/3}=0.05$ (b) $H_{1/3}/L_{1/3}=0.03$

図-8 傾斜護岸と緩傾斜護岸の無次元越波流量

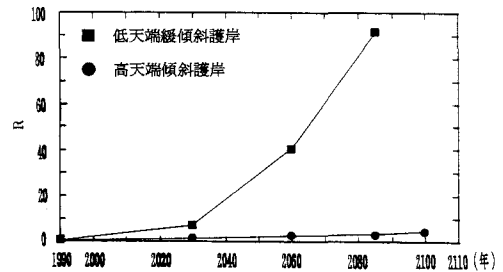


図-9 傾斜護岸と緩傾斜護岸における越波流量の増加率

岸の場合は、波が護岸上を遡上し、そのまま波の実質部分が越波するため、潮位上昇の影響が大きいのに対し、傾斜護岸は護岸上で碎波し、しぶきとなって越波するため、緩傾斜護岸の場合に比べると海面上昇の影響は小さくなるためと考えられる。このように、現在の設計条件で機能設計された傾斜護岸および緩傾斜護岸の天端高を現状のままとして、将来の海面上昇に対する越波防止機能を比較検討した。その結果によると、いずれの波形勾配においても、現況では越波率も越波流量も緩傾斜護岸のほうが傾斜護岸のものより小さいが、緩傾斜護岸の越波特性は、潮位の変化に対しシャープであるため、ある潮位以上に海面が上昇すると越波流量は急増し、傾斜護岸に比べきわめて危険な事態が予測される。したがって、近年その施工数が増大している緩傾斜護岸については、こうした海面上昇に対し、越波防止機能がある時期

を境として急激に低下しないように効果的な対策をあらかじめ工夫しておくことが重要であろう。

4. 結 語

以上、著者らは、潮位と波浪規模、すなわち具体的にはより先水深・波長比と波形勾配を種々変化させた不規則波による海岸護岸の越波に関する模型実験を行い、海岸護岸の越波特性に及ぼす海面上昇の影響を検討してきた。それらの結果を要約するとつぎのようである。

1) すべての実験条件に対し越波しなかった高天端緩傾斜護岸の場合を除くと、越波率はいずれの護岸の場合も潮位の上昇とともに増大し、特に、この傾向は低天端緩傾斜護岸の場合に著しい。したがって、低天端の傾斜護岸と緩傾斜護岸の越波率を比較すると、潮位が低いときは傾斜護岸のほうがかなり大きい、潮位の上昇とともにその差は小さくなり、ある潮位以上では逆に緩傾斜護岸のほうが大きくなる。また、越波率は波形勾配の増大とともに、傾斜護岸では天端高の高低にかかわらず急激に増大するが、緩傾斜護岸ではあまり増大しない。

2) いずれの護岸の場合も、越波流量は潮位の上昇や波形勾配の増大とともに増大する。また、この増大量はより面勾配の緩急にかかわらず、低天端護岸のものが高天端護岸のものよりも大きい。

3) 越波特性に及ぼす海面上昇の影響をより具体的に示すために、IPCCの海面上昇量の予測上限値を現在の高天端傾斜護岸と低天端緩傾斜護岸の実験結果に適用し

た。それによると、現況での越波率や越波流量は、いずれの波形勾配についても傾斜護岸のものの方が緩傾斜護岸のものよりも大きい。しかし、海面が上昇するにつれて、緩傾斜護岸の越波防止機能の低下は著しく、その越波率や越波流量は傾斜護岸のものよりも大きくなる。なお、こうした傾向は、波形勾配が小さい場合には一層顕著である。

以上の結果から、緩傾斜護岸は波高の変化に対しては好ましい越波特性を有しているが、潮位の変化に対してはむしろ傾斜護岸の越波特性が優れていることが明らかになった。したがって、今後の緩傾斜護岸の機能設計に際しては、潮位の上昇に対して有効な越波防止対策を講じておくべきであろう。

今後は、こうした検討を越波率と越波流量についてだけでなく、代表越波量や越波量の出現頻度分布などについても考察を進めていきたい。

最後に、本研究に際して大いに助力してくれた、現在、建設省北陸地方建設局の桶川勝功、東亜建設工業(株)の園部 宏、日本シールドエンジニアリング(株)の長谷川洋の諸君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 三村信男・磯部雅彦・細川恭史・灘岡和夫 (1991): 地球温暖化による海面上昇・海象変化の影響評価, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 936-940.